

# Hydro-géophysique 2020

RMP et ressources en eau

# Plan

- Intro : principe de la géophysique
- Problématique : localiser et quantifier une ressource en eau
- Principe physique
- Appareillage
- Limitations
- Traitement des données
- Intégration dans une problématique scientifique

## **Notions fondamentales**

- Séquence de mesure RMP
- Modèle et données RMP dans le problème inverse
- Eau libre et eau liée

## **Notions complémentaires**

- Spin
- Fréquence de Larmor
- Equivalence de l'inversion

# Principe de la géophysique

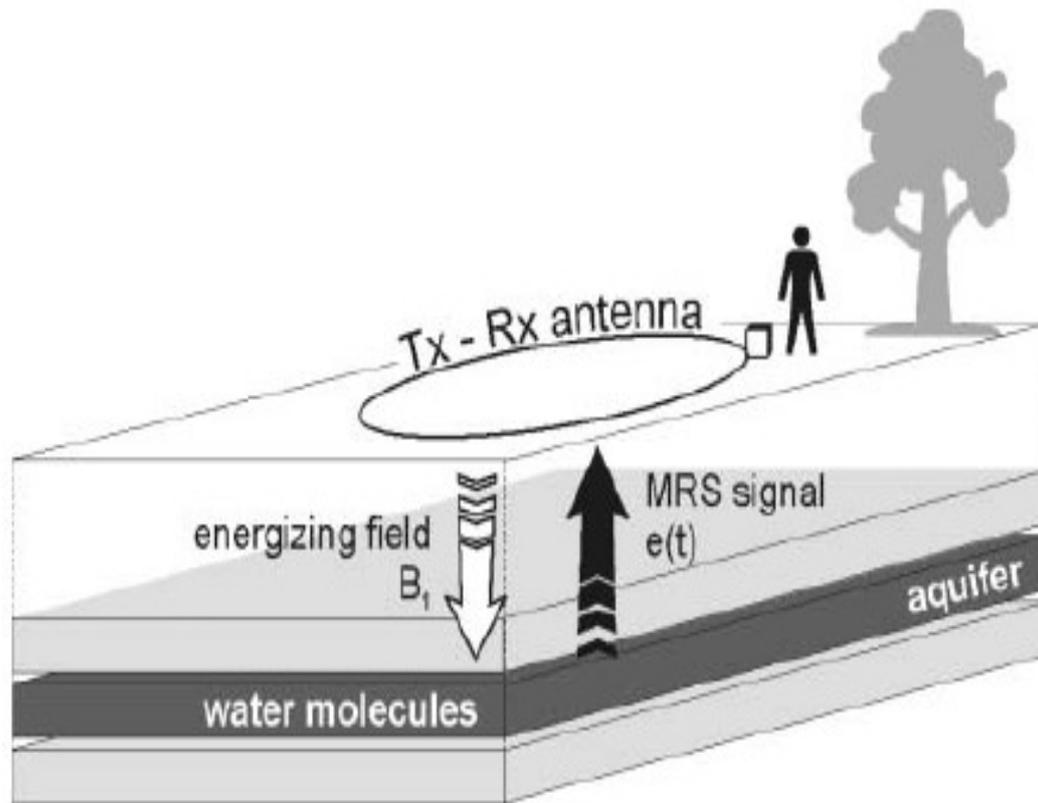
- Loi reliant deux paramètres physiques :  $U = RI$
- Avec une inconnue  $I$
- Une constante  $R$
- Une quantité observable  $U$

→ On va mesurer  $U$  pour calculer  $I$

# Localiser / quantifier / décrire une ressource en eau

- Quelle loi physique utiliser ?
- Contrainte : depuis la surface
- Contrainte 2 : moins chère et plus rapide qu'un forage + pompage

# Le principe de la RMP



- 1- On crée un champ magnétique en injectant un courant dans une boucle en surface
- 2- Dans la même boucle en surface, on mesure le courant créé par le champ magnétique dû à la précession (relaxation) des molécules d'H.

# Une séquence de mesure

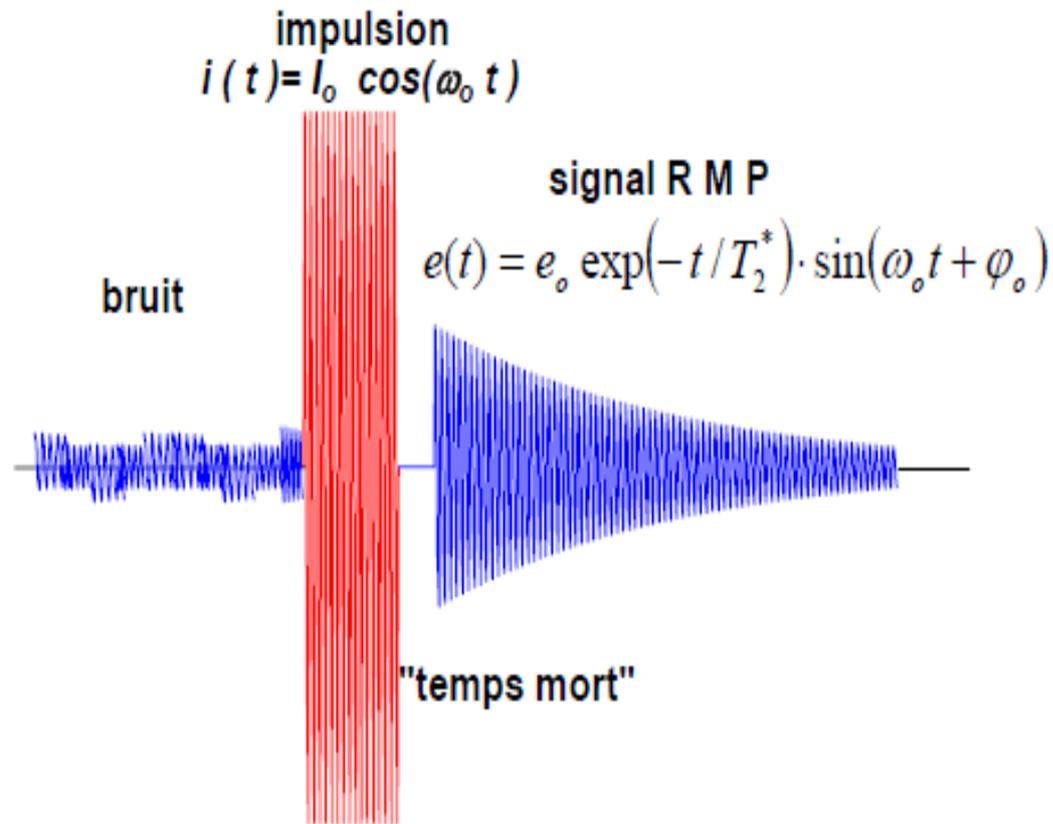
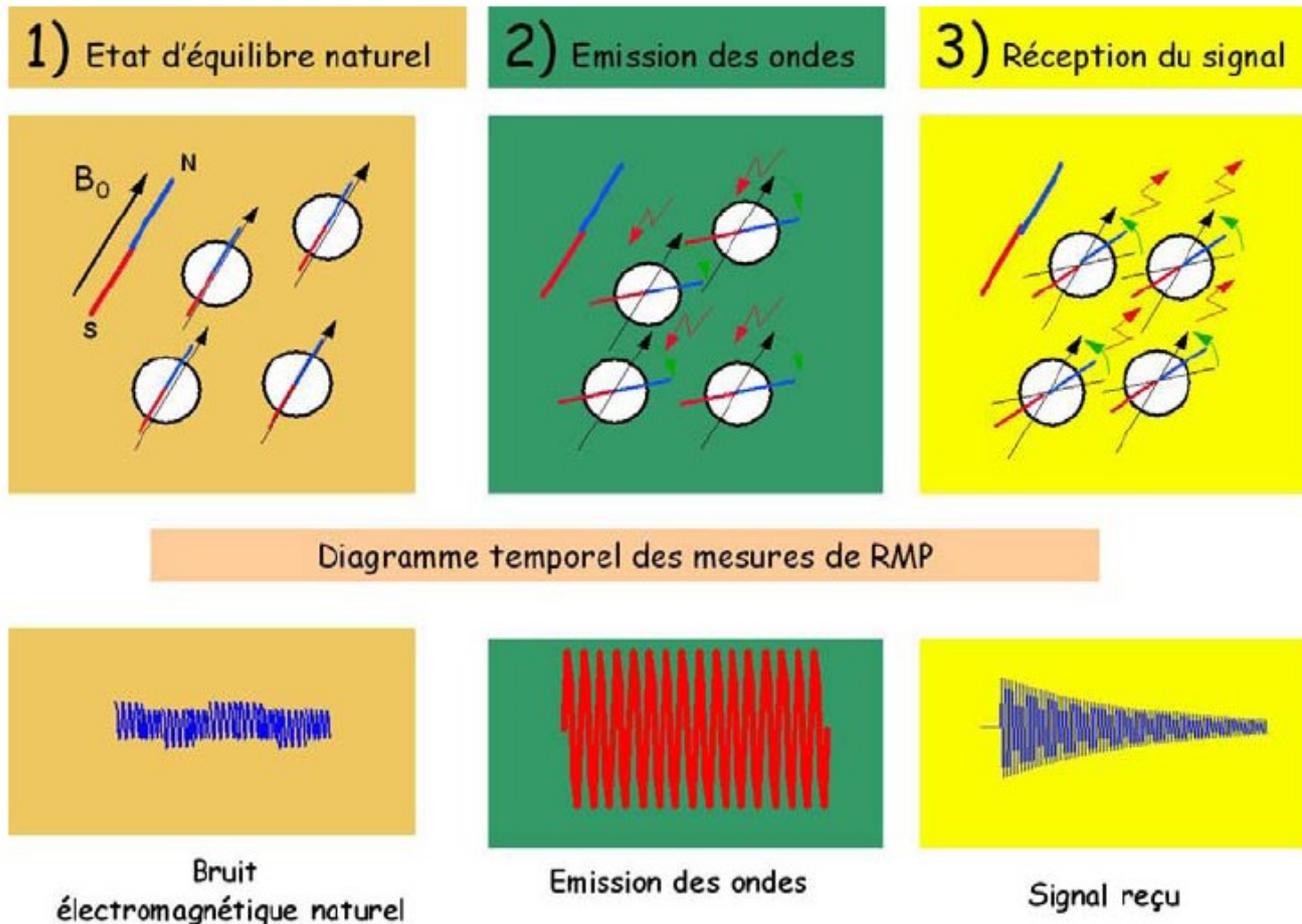


Figure 1-30. Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception

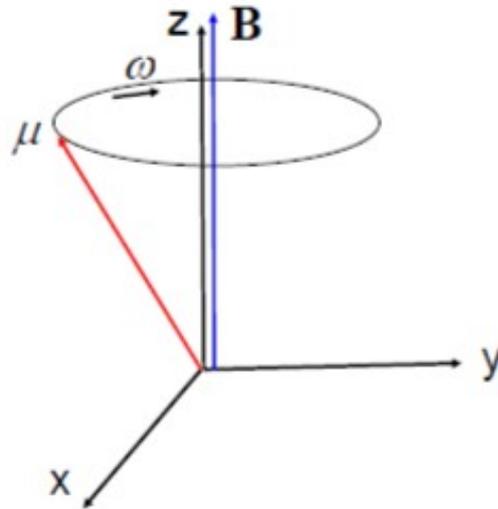
- On cible les atomes d'H en choisissant la fréquence  $\omega_0$  = la fréquence de Larmor de l'hydrogène.

# Principe physique

- Relaxation du champ magnétique des protons de l'hydrogène



# Le moment magnétique

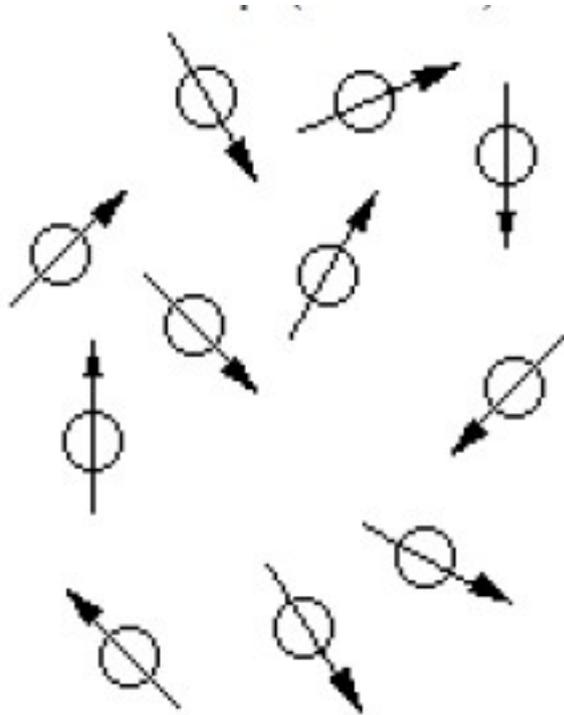


*Figure 1-17. Précession d'un moment magnétique  $\mu$  autour d'un champ magnétique  $B$*

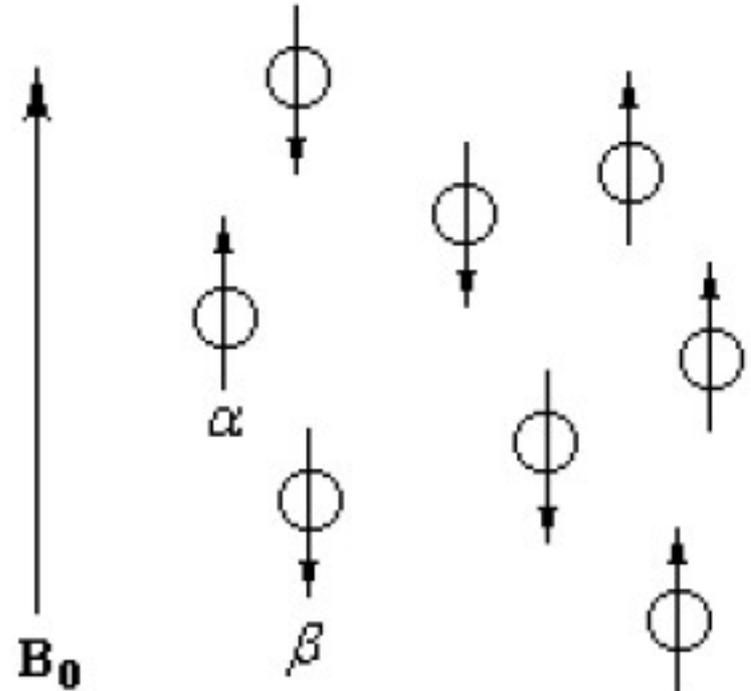
*$\omega$  est la fréquence angulaire de Larmor*

En physique, la précession de Larmor est la précession du moment magnétique des électrons, des noyaux atomiques ou des atomes soumis à un champ magnétique.

# Spin et moment magnétique



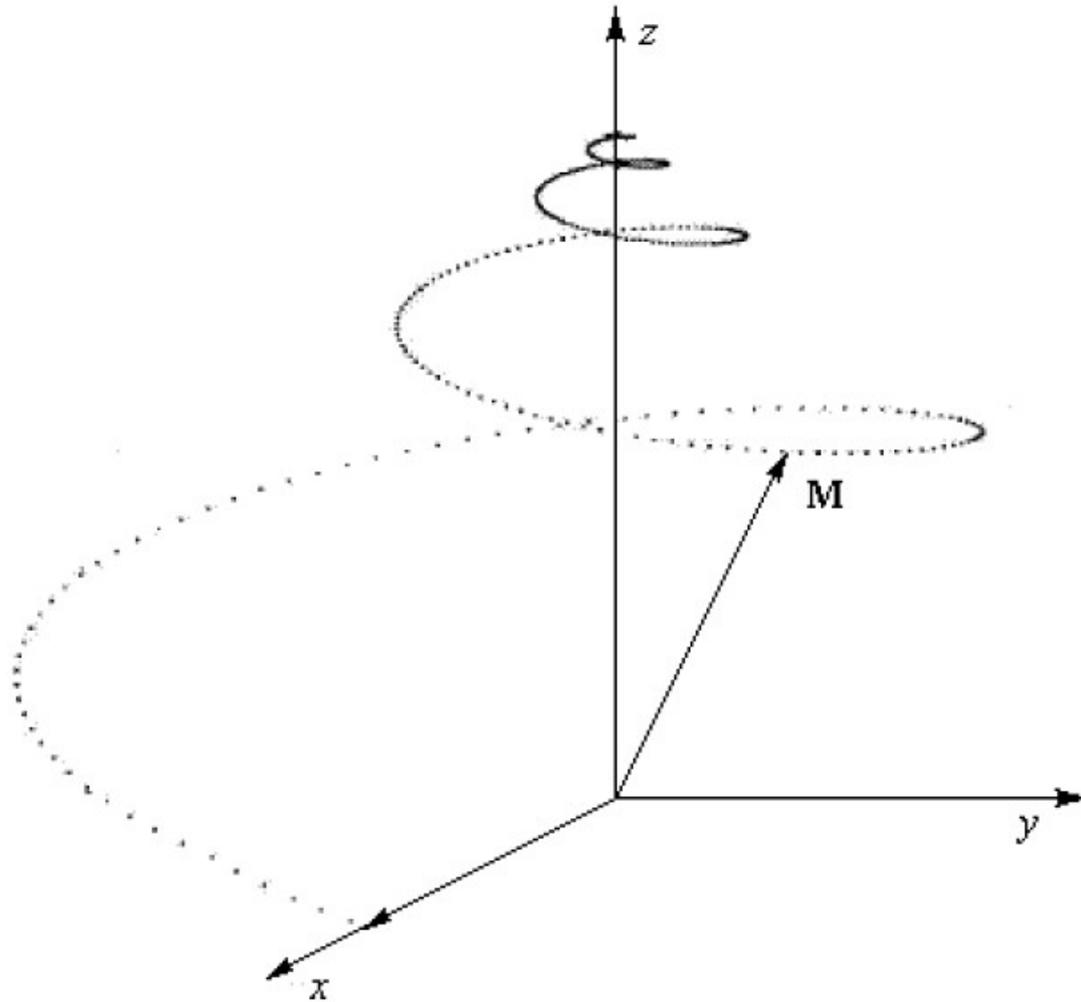
Sans champ magnétique  
extérieur



En présence d'un champ  
magnétique extérieur

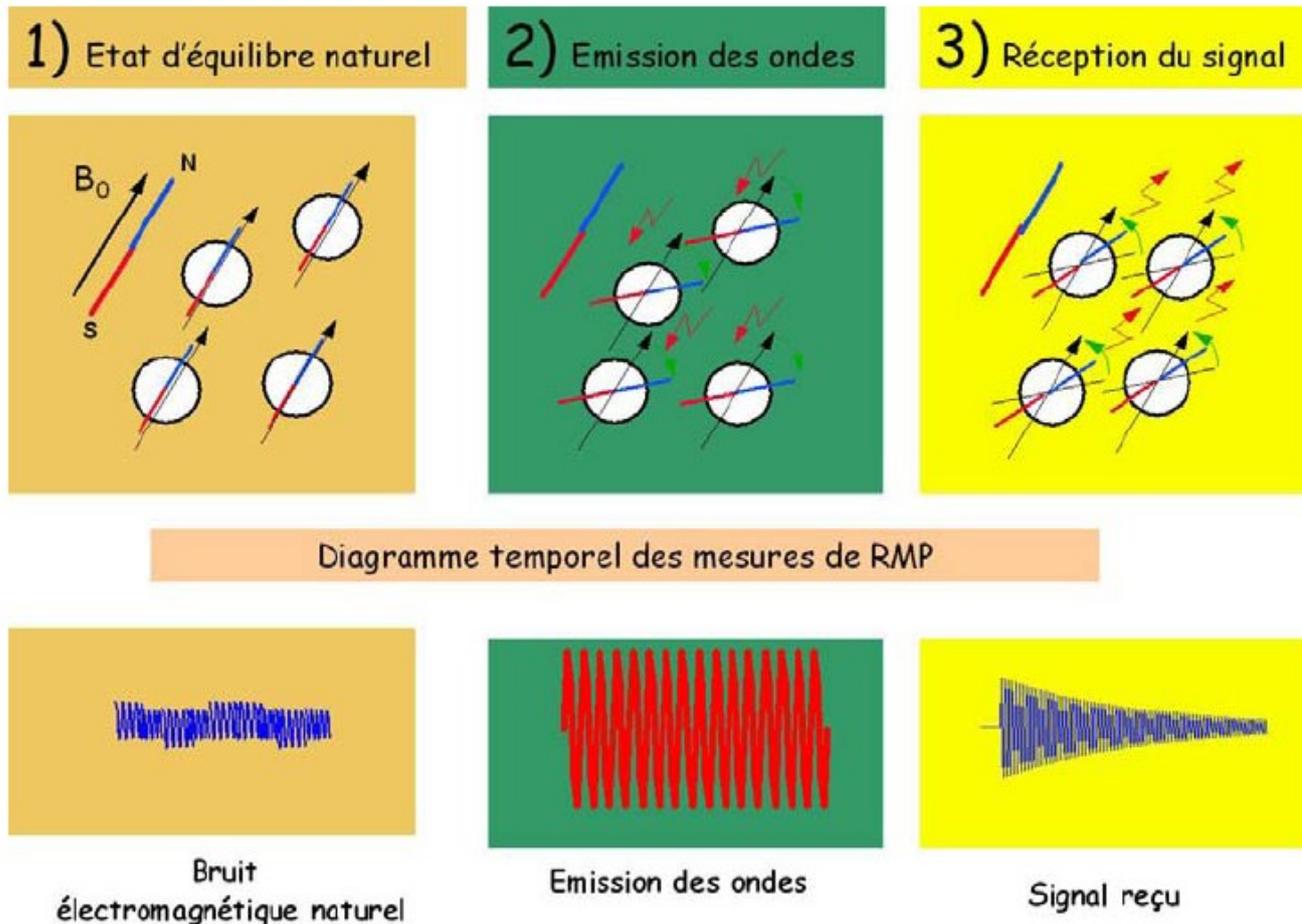
$$\frac{N_{\beta}}{N_{\alpha}} \approx 0,9999911$$

# La « précession » de relaxation



# Principe physique

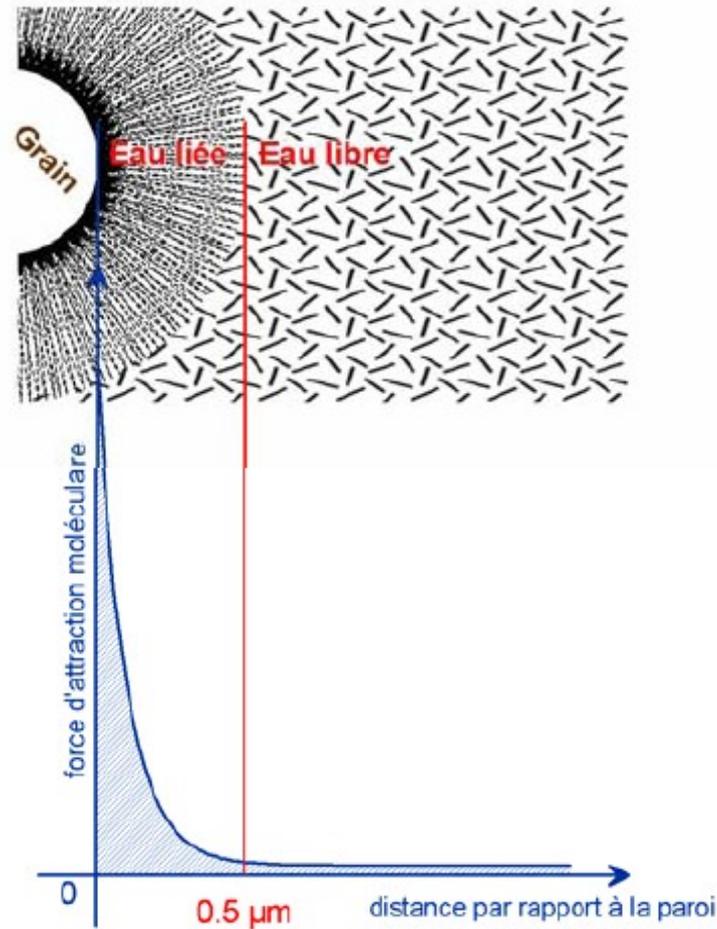
- Relaxation du champ magnétique des protons de l'hydrogène



# Paramètres mesurés

- La constante de temps de relaxation longitudinale, T1 caractérise la relation entre les protons et leur environnement → Transmissivité
- La constante de temps de relaxation transversale, T2 caractérise les échanges d'énergie entre les protons → Taille des pores
- L'amplitude du signal → Saturation / Teneur en eau

# Qu'est-ce-que l'on mesure ?



*Figure 1-4. Structure d'une couche d'eau liée au contact d'une particule solide  
(D'après de Marsily, 1981)*

# Cousins de la RMP

- IRM en domaine médicale
- RMN en chimie
- En diagraphie

# L'appareil NUMIS



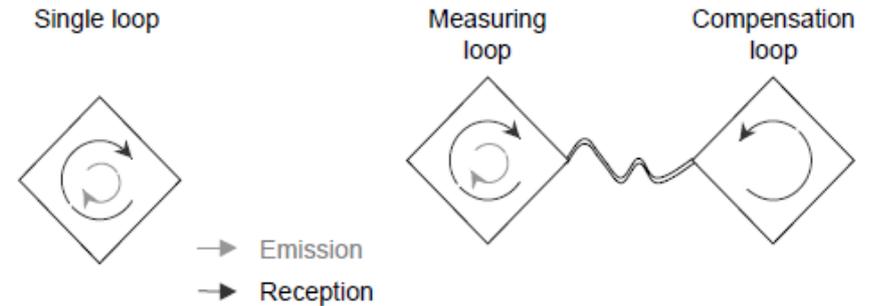
*Figure 1-29. Equipement de Résonance Magnétique Protonique NUMIS<sup>PLUS</sup> sur site  
(Photo prise à Kolo Bossey au Niger en novembre 2006)*

# Résolution et profondeur d'investigation

- Résolution : de l'ordre de quelques mètres en surface et dizaine de mètres en profondeur.
- Profondeur : 100-150 m maximum
- Volume investigué : 1.5\* taille de la boucle

# Mise en Oeuvre

- Mesure avec en « huit »

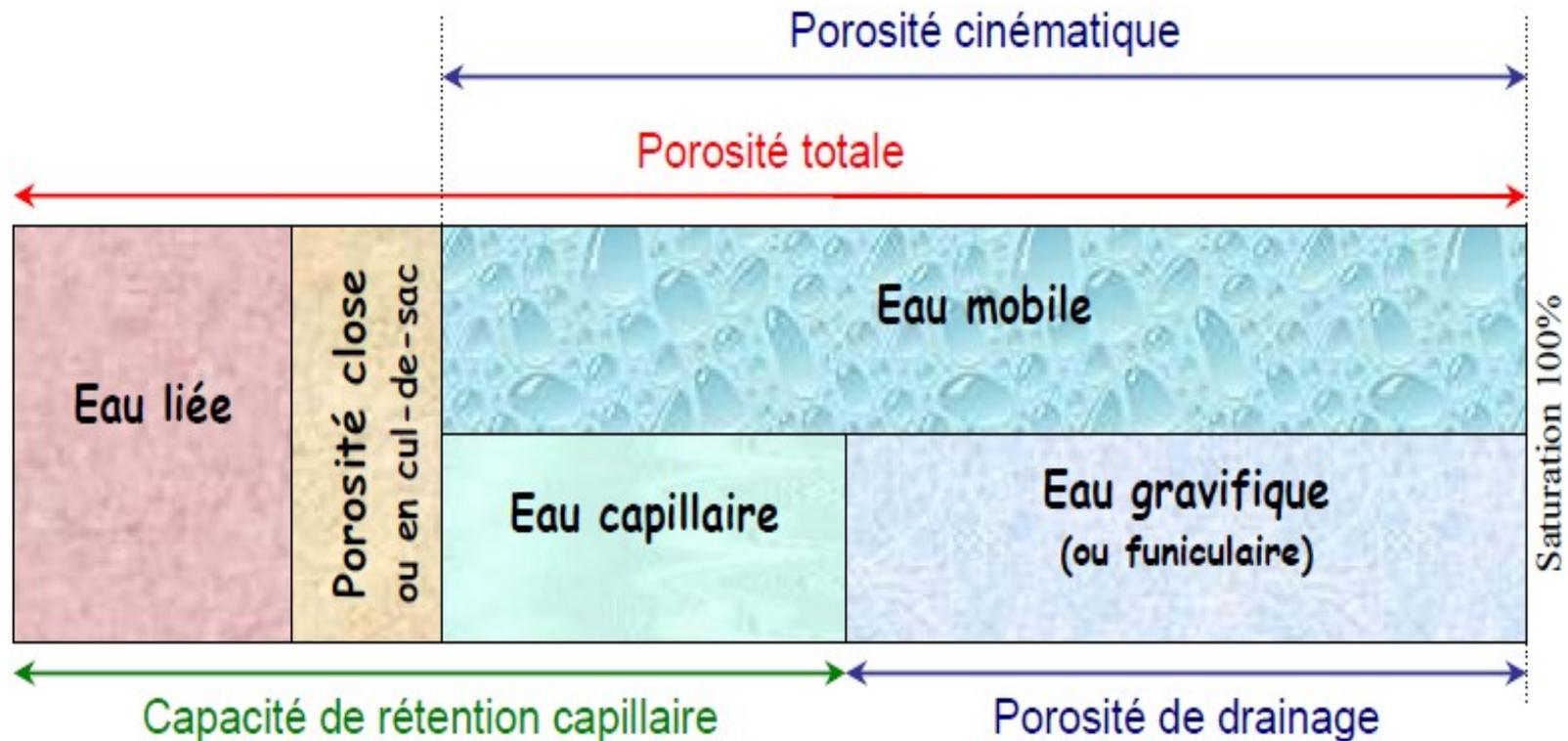


- Temps d'un sondage : entre 2 et 12h (stacking)
- Poids : 150 kg
- Prix : entre 100 et 200 k€

# Sources de bruits

- Sources de courant anthropiques
- Perturbations du champ magnétique terrestre (ionosphère, orage)
- Roches magnétiques
- PS : on mesure quelques nanovolts !

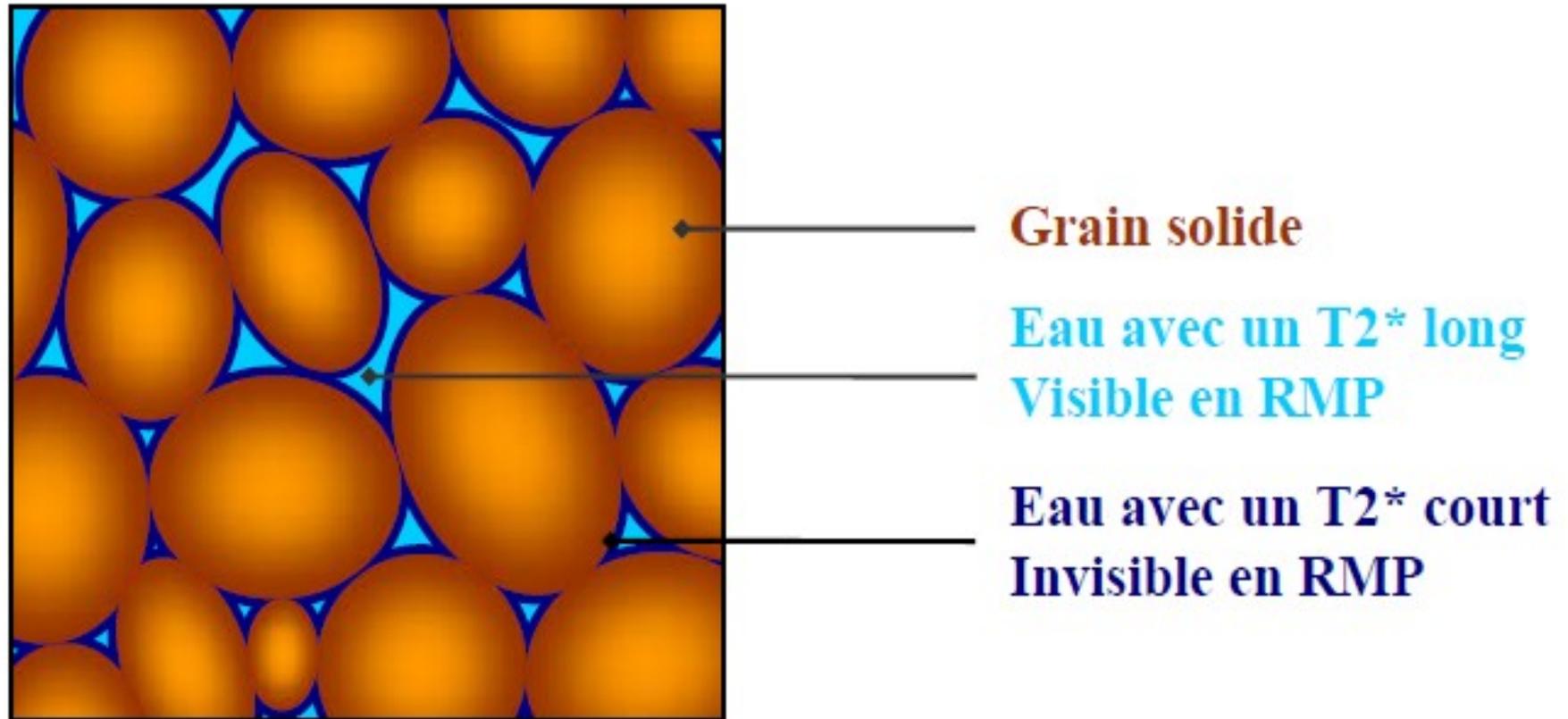
# Et comment on l'interprète



*Figure 1-5. Porosités hydrogéologiques*

*(Modifiée d'après de Marsily, 1981 et d'après Lubczynski et Roy, 2003)*

# Eau visible et invisible en RMP



*Figure 1-34. Détectabilité de l'eau en RMP*

# Logiciel de traitement

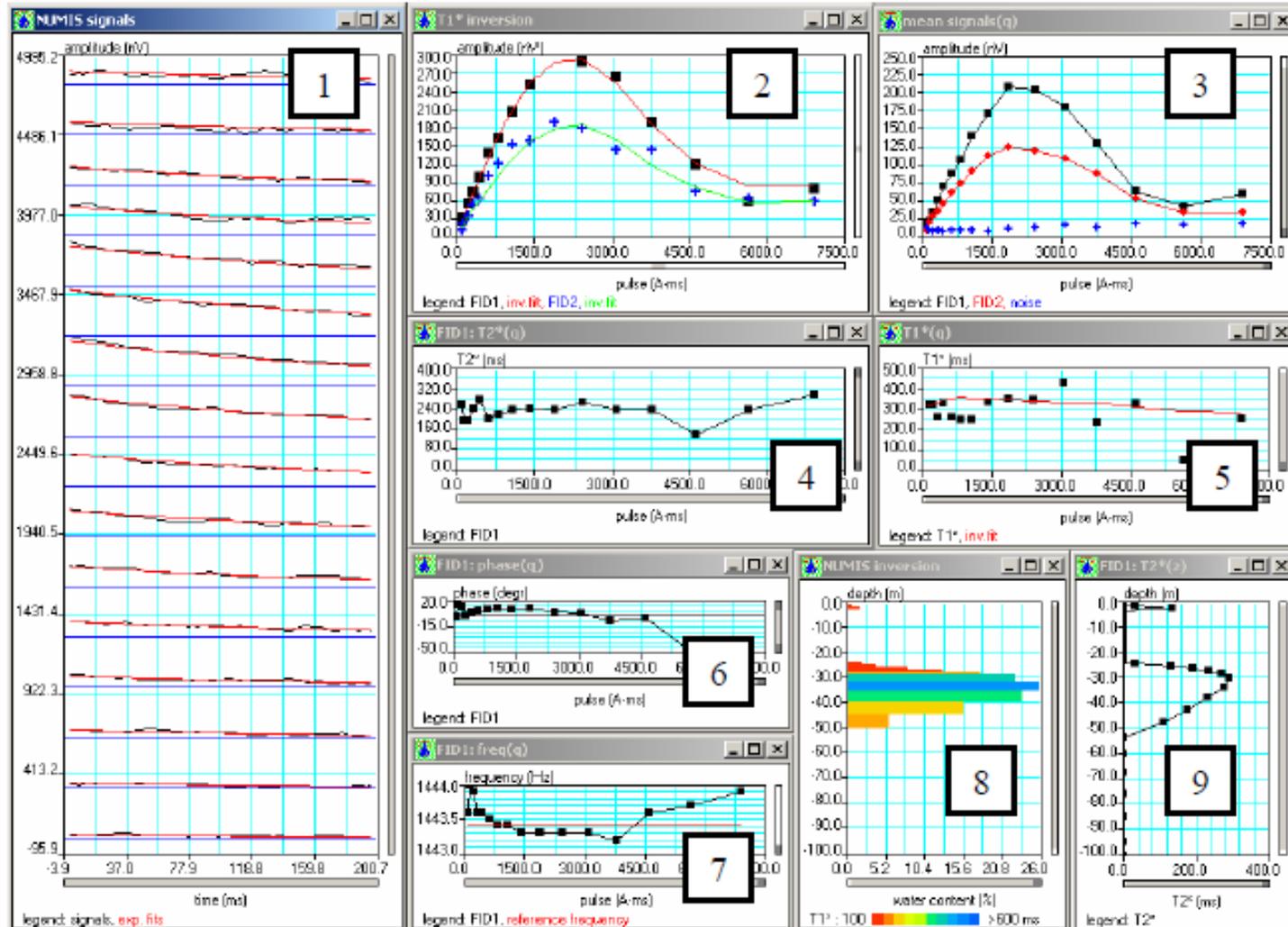


Figure 1-32. Exemple de résultats d'inversion automatique

# Le problème inverse

- $U=RI$ , on connaît  $I$ , on mesure  $U$  trouver  $R$  !
- En RMP, c'est presque pareil....
- Et comment faire un sondage vertical ?

# Résultats

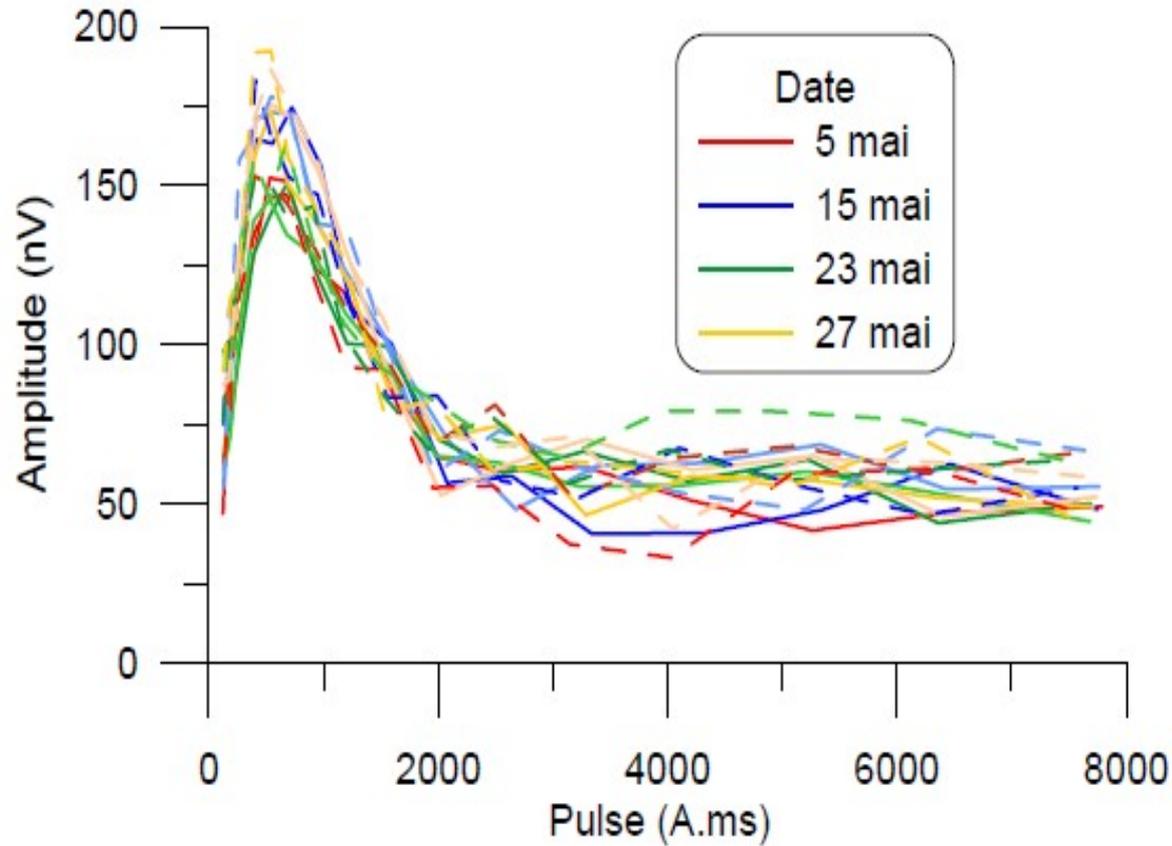
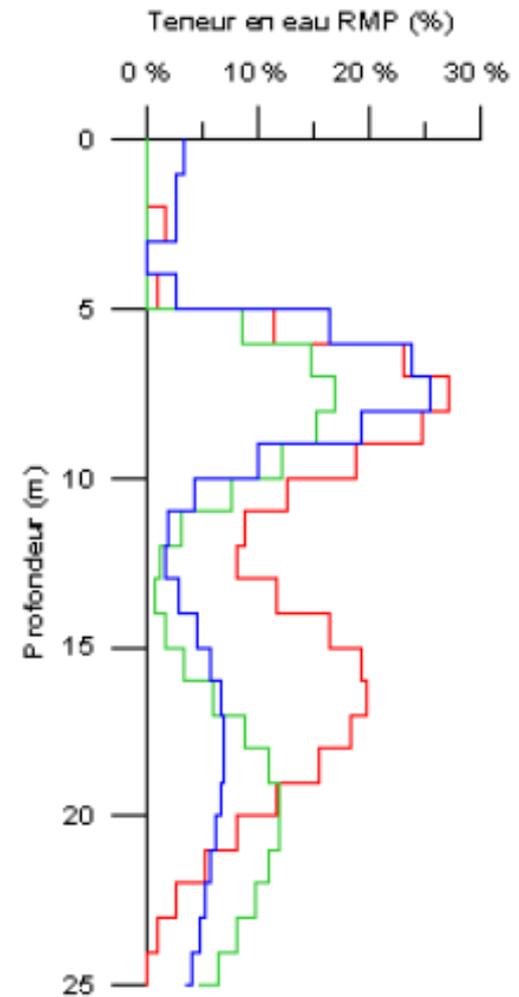


Figure 2-4. Sondages RMP réalisés en mai 2003 à Marcilly



# Problème d'équivalence

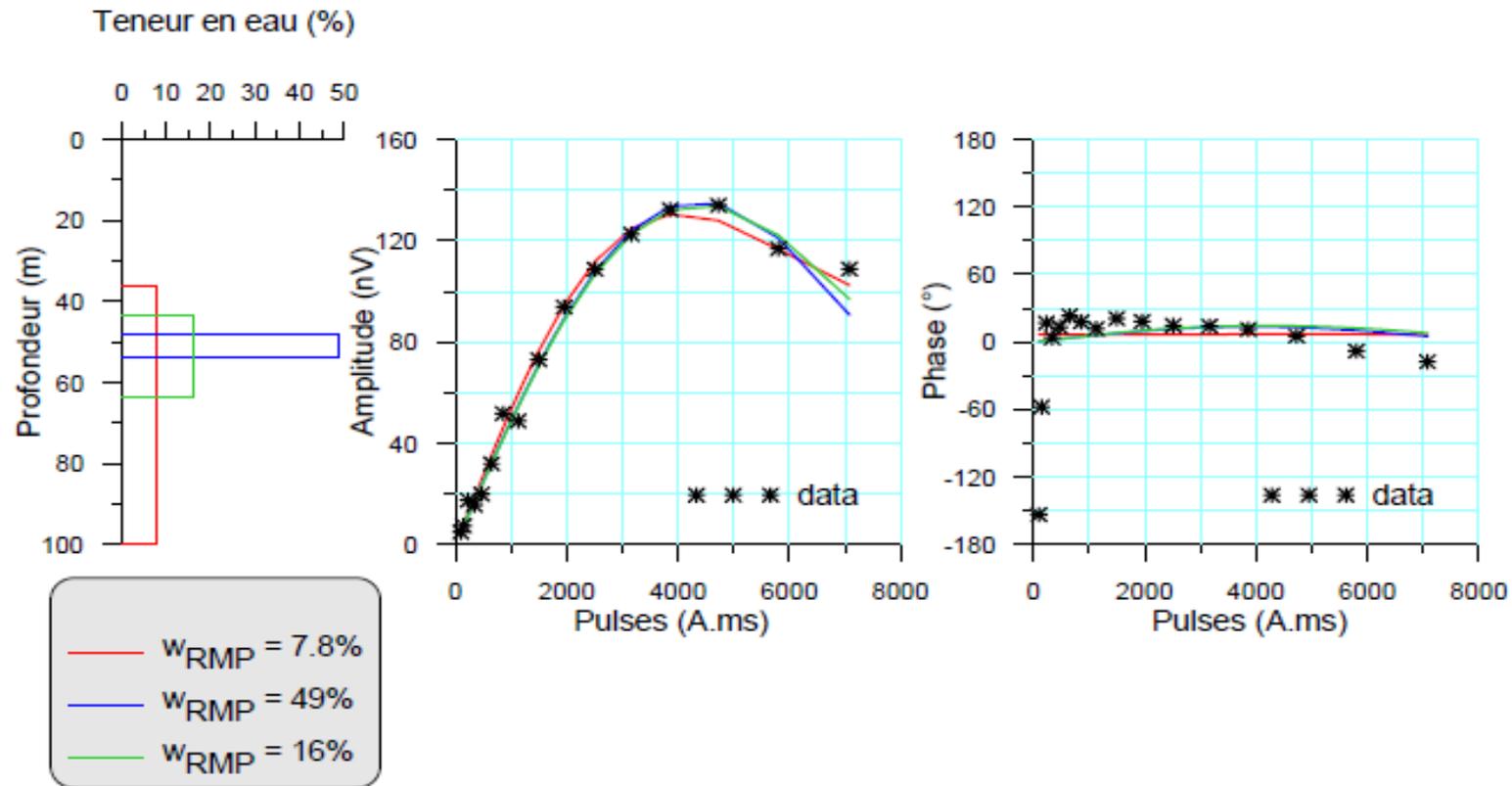


Figure 3-1. Exemple d'équivalence sur le site de Gassan Kournie

A gauche : modèle de teneur en eau ; au milieu : amplitude du signal RMP correspondant ; à droite : phase du signal RMP.

# Applications

- Recherche en eau avant forage (Action contre la Faim)
- Cartographie des réserves en eau
- Caractérisation des réservoirs pétrolier avec la RMP en puits (porosité / transmissivité)